

Spis treści

Od autora	13
Spis wybranych oznaczeń i symboli	15
1. Wprowadzenie	21
1.1. Kompatybilność elektromagnetyczna	21
1.1.1. Dyrektywa europejska	24
1.2. Jakość dostawy energii elektrycznej	25
1.2.1. Historia dziedziny	27
1.2.2. Definicje jakości dostawy energii elektrycznej	29
1.3. Źródła złej jakości dostawy energii elektrycznej	31
1.4. Rodzaje zaburzeń elektromagnetycznych	32
1.5. Zasady poprawy jakości dostawy energii elektrycznej	34
1.6. Partnerzy na rynku energii elektrycznej	35
1.6.1. Odbiorca energii elektrycznej	36
1.6.2. Dostawca energii elektrycznej	39
1.6.3. Producent urządzeń	41
1.7. Przyczyny wzrostu zainteresowania jakością dostawy energii elektrycznej	43
Literatura	45
2. Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) i jakość energii elektrycznej w normalizacji	49
2.1. Organizacje normalizacyjne	49
2.1.1. Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna (IEC)	49
2.1.1.1. Normy podstawowe	50
2.1.1.2. Normy rodzajowe (ogólne)	51
2.1.1.3. Normy produktu (przedmiotowe)	52
2.1.2. Europejski Komitet Normalizacyjny Elektrotechniki (CENELEC)	52
2.1.3. Inne międzynarodowe organizacje normalizacyjne	53
2.1.4. Narodowe organizacje normalizacyjne	54

2.2. Perspektywy normalizacji	55
2.3. Normalizacja jakości energii elektrycznej w Polsce	55
Literatura	56
3. Wolne zmiany napięcia	58
3.1. Wprowadzenie	58
3.2. Skutki zmian wartości skutecznej napięcia	61
3.3. Pomiar wskaźników jakości napięcia	63
3.3.1. Organizacja pomiarów	63
3.3.2. Klasy pomiarów	64
3.3.3. Agregacja pomiarów w czasie	64
3.3.4. Niepewność zegara czasu rzeczywistego	68
3.3.5. Koncepcja oznaczania	68
3.3.6. Odchylenie napięcia w górę i w dół	69
3.4. Statystyczne miary wskaźników jakości energii elektrycznej	70
3.5. Normalizacja wartości napięcia	75
3.6. Pojedyncza zmiana napięcia	76
3.7. Układy regulacji napięcia	81
Literatura	82
4. Wahania napięcia	84
4.1. Wprowadzenie	84
4.2. Źródła wahań napięcia	84
4.2.1. Piece łukowe	85
4.2.2. Urządzenia spawalnicze i zgrzewające	87
4.2.3. Silniki indukcyjne	88
4.2.4. Baterie kondensatorów	88
4.2.5. Elektrownie wiatrowe	89
4.2.6. Interharmoniczne napięcia	89
4.3. Skutki wahań napięcia	93
4.3.1. Źródła światła	93
4.3.2. Maszyny elektryczne	97
4.3.3. Przekształtniki statyczne	97
4.3.4. Urządzenia do elektrolizy i urządzenia elektrotermiczne	98
4.4. Pomiar wahań napięcia	98
4.4.1. Klasyczne wskaźniki wahań napięcia	99
4.4.2. Pomiar migotania światła	99
4.4.3. Miernik migotania światła	101
4.4.3.1. Blok 1 (normalizacja napięcia)	102
4.4.3.2. Blok 2 (demodulacja)	103
4.4.3.3. Blok 3 (filtracja)	104
4.4.3.4. Blok 4 (podnoszenie do kwadratu i wygładzanie)	107

4.4.3.5. Blok 5 (ocena statystyczna)	108
4.4.3.6. Czas obserwacji	109
4.4.3.7. Krótkookresowy wskaźnik migotania światła	110
4.4.3.8. Długookresowy wskaźnik migotania światła	112
4.4.4. Przykładowe wyniki pomiarów w sieci WN	115
4.5. Badania porównawcze mierników migotania światła	118
4.5.1. Badania w środowisku przemysłowym	120
4.5.2. Badania laboratoryjne	122
4.5.2.1. Test 1: analiza sygnału na wyjściu bloku 4	122
4.5.2.2. Test 2: modulacja prostokątna	123
4.5.2.3. Test 3: zapady i wzrosty napięcia	124
4.5.2.4. Test 4: skokowa zmiana fazy	125
4.5.2.5. Test 5: liniowość wyników pomiaru dla modulacji przebiegiem prostokątnym	126
4.5.2.6. Test 6: liniowość wyników pomiaru dla modulacji przebiegiem sinusoidalnym	127
4.5.2.7. Test 7: wskazania miernika w odpowiedzi na zmianę częstotliwości przebiegu modulowanego	128
4.5.2.8. Test 8: wskazania miernika w odpowiedzi na modulację przebiegiem sinusoidalnym	129
4.6. Nowe koncepcje konstrukcji miernika migotania	132
4.7. Lokalizacja źródeł wahań napięcia	135
4.7.1. Metoda 1: pomiar wahań napięcia podczas pracy i po wyłączeniu odbiornika niespokojnego	137
4.7.2. Metoda 2: korelacja zmian wskaźnika P_{st} oraz zmian mocy biernej i czynnej	139
4.7.3. Metoda 3: wpływ wahań napięcia w poszczególnych liniach zasilających na całkowite zaburzenie w PWP	139
4.7.4. Metoda 4: pomiar zmian napięcia i prądu	141
4.7.5. Metoda 5: pomiar zmian napięcia	141
4.7.6. Metoda 6: badanie nachylenia charakterystyki $U-I$	142
4.7.7. Metoda 7: badanie kierunku przepływu mocy interharmonicznych	144
4.7.8. Metoda 8: badanie „mocy (energii) wahań napięcia”	144
4.8. Normalizacja wahań napięcia	146
4.8.1. Poziomy kompatybilności, emisji i odporności	146
4.8.2. Charakterystyki napięcia	147
4.8.3. Poziomy planowane	148

4.9. Propagacja wahań napięcia	148
4.9.1. Propagacja wahań napięcia spowodowanych pracą pojedynczego odbiornika niespokojnego	149
4.9.2. Wahania napięcia pochodzące z wielu źródeł	152
4.9.3. Propagacja wahań napięcia w sieciach zamkniętych	153
4.10. Warunki techniczne przyłączenia	154
4.10.1. Graniczny poziom emisji wahań napięcia	156
4.10.2. Współczynniki propagacji w procedurze przydzielania emisji ...	160
4.10.2.1. Zastosowanie współczynników propagacji dla realokacji niewykorzystanej emisji	160
4.10.2.2. Realokacja niewykorzystanych emisji pomiędzy sieciami o różnych poziomach napięcia	162
4.11. Ocena poziomu emisji wahań napięcia	163
4.11.1. Ocena emisji wahań i zmian napięcia odbiorników małej i średniej mocy	163
4.11.1.1. Wyznaczanie względnej zmiany napięcia d	164
4.11.1.2. Metoda analityczna	165
4.11.1.3. Szacowanie wartości wskaźnika P_{st} dla nieokresowych zmian napięcia	167
4.11.2. Ocena emisji wahań napięcia odbiorników dużej mocy	167
4.11.2.1. Ocena poziomu emisji wahań na podstawie pomiarów porównawczych	168
4.11.2.2. Ocena poziomu emisji wahań na podstawie analizy statystycznej	168
4.11.2.3. Pomiary poziomu emisji wahań napięcia	169
4.12. Wahania napięcia wywołane pracą rozproszonych źródeł energii	177
4.12.1. Układ silnik – generator	177
4.12.2. Turbiny wiatrowe	177
4.12.2.1. Praca ciągła	179
4.12.2.2. Procesy łączeniowe turbin wiatrowych	180
4.12.3. Wahania napięcia a zapady napięcia – analiza przypadku	182
4.13. Sposoby redukcji skutków wahań napięcia	185
Literatura	192
5. Asymetria napięć i prądów	201
5.1. Wprowadzenie	201
5.1.1. Podstawy analizy	202
5.1.2. Analiza obwodów elektrycznych w układzie składowych symetrycznych	204
5.1.3. Asymetria w teoriach mocy obwodów elektrycznych	207
5.1.3.1. Układy jednofazowe z przebiegami sinusoidalnymi	208

5.1.3.2. Układy trójfazowe z przebiegami sinusoidalnymi	210
5.1.3.3. Składowe fizyczne prądu	213
5.1.4. Liczbowe miary asymetrii	217
5.1.4.1. Współczynnik asymetrii dla składowej przeciwnej	217
5.1.4.2. Współczynnik asymetrii dla składowej zerowej	218
5.2. Pomiar współczynników asymetrii	218
5.3. Źródła niesymetrii	222
5.4. Skutki niesymetrii	223
5.4.1. Silniki asynchroniczne	224
5.4.2. Generatory synchroniczne	225
5.4.3. Linie zasilające	226
5.4.4. Przekształtniki statyczne	228
5.4.5. Odbiorniki jednofazowe	230
5.4.6. Układy sterowania i zabezpieczeń	230
5.5. Odporność urządzeń na niesymetrię napięcia	231
5.6. Normalizacja	232
5.7. Przykładowe wyniki pomiarów	233
5.8. Propagacja składowych symetrycznych	235
5.9. Lokalizacja źródeł niesymetrii napięcia	236
5.10. Warunki techniczne przyłączenia	238
5.11. Symetryzacja	243
5.11.1. Symetryzacja „naturalna”	243
5.11.2. Zmiana konfiguracji odbiornika lub warunków jego pracy	244
5.11.3. Transformator Scotta	244
5.12. Zasady symetryzacji prądów sieci zasilającej za pomocą symetryzatorów statycznych	246
5.12.1. Symetryzacja odbiornika połączonego w trójkąt	251
5.12.2. Symetryzacja odbiornika połączonego w gwiazdę bez przewodu neutralnego	255
5.12.3. Symetryzacja odbiornik trójprzewodowego – „czarna skrzynka”	255
5.13. Kompensatory statyczne	256
Literatura	256
6. Zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu	261
6.1. Wprowadzenie	261
6.2. Definicje	262
6.3. Opis zaburzenia	267
6.3.1. Źródła zapadów napięcia	267
6.3.1.1. Zwarcia systemowe lub zwarcia w instalacjach odbiorczych	267
6.3.1.2. Procesy załączania odbiorników dużej mocy	272

6.3.2. Czas trwania zapadu napięcia	276
6.3.3. Amplituda zapadu napięcia	277
6.3.3.1. Odległość od miejsca zwarcia	277
6.3.3.2. Rodzaj sieci zasilającej	278
6.3.4. Częstość zapadów napięcia	279
6.3.5. Trójfazowe niesymetryczne zapady napięcia	281
6.3.5.1. Zwarcia doziemne jednofazowe	281
6.3.5.2. Zwarcie międzyprzewodowe dwufazowe	282
6.3.5.3. Układ połączeń transformatora	283
6.3.5.4. Zwarcie doziemne dwufazowe	286
6.3.6. Krótkie przerwy w zasilaniu	288
6.4. Skutki zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu	289
6.4.1. Sprzęt informatyczny i układy sterowania	291
6.4.2. Styczniki i przekładniki	294
6.4.3. Lampy wyładowcze	299
6.4.4. Silniki asynchroniczne	299
6.4.5. Silniki synchroniczne	303
6.4.6. Regulowane napędy elektryczne	303
6.4.6.1. Napędy prądu stałego	305
6.4.6.2. Napędy prądu przemiennego	306
6.4.7. Rozproszone źródła energii	309
6.5. Badanie odporności urządzeń na zapady napięcia	311
6.6. Redukcja skutków zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu	314
6.6.1. Sposoby redukcji skutków stosowane po stronie dostawcy energii	317
6.6.1.1. Zmniejszenie liczby zwarć	317
6.6.1.2. Zmniejszenie prądów zwarciovych	317
6.6.1.3. Zmniejszenie czasu eliminacji zwarcia	318
6.6.1.4. Automatyka SPZ	319
6.6.1.5. Zmiana konfiguracji systemu zasilającego	320
6.6.2. Sposoby stosowane po stronie odbiorcy energii	321
6.6.3. Poprawa odporności sprzętu	323
6.6.3.1. Zasilacze prądu stałego	325
6.6.3.2. Poprawa odporności napędów elektrycznych	325
6.7. Pomiar zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu	338
6.7.1. Zasady pomiaru	340
6.7.2. Cechy przyrządów pomiarowych	343
6.7.2.1. Napięcie referencyjne	344
6.7.2.2. Czas trwania zapadu – wartości progowe początku i końca zaburzenia	345
6.7.3. Zapad napięcia i krótka przerwa w zasilaniu	347
6.7.4. Zapady nieprostokątne	347

6.7.5. Klasyfikacja wyników pomiarów	348
6.7.6. Przykładowe wyniki pomiarów	353
6.8. Metody analizy	355
6.8.1. Metoda miejsc zwarciovych	356
6.8.2. Metoda krytycznej odległości	357
6.9. Normalizacja	357
6.10. Kontrakt	359
6.10.1. Czas pomiarów	360
6.10.2. Wartość napięcia referencyjnego	360
6.10.3. Miejsce i sposób przyłączenia przyrządu pomiarowego	361
6.10.4. Dane techniczne aparatury pomiarowej	362
6.10.5. Wartości progowe detekcji zaburzenia	362
6.10.6. Technika raportowania wyników pomiaru	363
6.10.7. Metody agregacji wyników pomiaru	363
6.10.7.1. Agregacja wartości	363
6.10.7.2. Agregacja fazowa	364
6.10.7.3. Agregacja czasowa	366
6.10.7.4. Agregacja lokalizacyjna	369
6.10.8. Przykłady postanowień kontraktowych i regulacje	370
6.10.8.1. USA	370
6.10.8.2. Francja	374
6.10.8.3. Republika Południowej Afryki	375
6.10.8.4. Holandia	376
6.11. Metody lokalizacji źródeł zapadów napięcia w sieci zasilającej	377
6.11.1. Analiza przebiegów czasowych napięć i prądów	379
6.11.2. Analiza trajektorii pracy systemu zasilającego podczas zapadu	379
6.11.3. Analiza zastępczego obwodu elektrycznego	383
6.11.4. Analiza mocy i energii podczas zaburzenia	384
6.11.5. Analiza zmiany napięcia	385
6.11.6. Analiza współczynnika asymetrii	386
6.11.7. Metody wykorzystujące algorytmy działania układów automatyki zabezpieczeniowej	387
6.11.7.1. Metoda oparta na analizie zmiany impedancji	388
6.11.7.2. Metoda wykorzystująca znak części rzeczywistej prądu zespolonego	390
6.11.7.3. Metoda wykorzystująca algorytm zabezpieczenia „odległościowego”	391
Literatura	392
7. Układy zasilające o podwyższonych wskaźnikach energetycznych	403
7.1. Wprowadzenie	403
7.2. Ciągłość dostawy energii elektrycznej	404

7.3. Urządzenia zasilania rezerwowego	405
7.3.1. Niezależna linia zasilająca	406
7.3.2. Energoelektroniczne układy szybkiego przełączania źródeł zasilania	406
7.3.3. Wyłączniki półprzewodnikowe	408
7.3.4. Zasilacze wirujące	408
7.3.4.1. Agregaty prądotwórcze	409
7.3.4.2. Maszyny z przemagnesowywanymi biegunami	412
7.3.5. Statyczne bezprzerwowe układy zasilające prądu stałego	413
7.3.6. Statyczne bezprzerwowe układy zasilające prądu przemiennego	416
7.3.7. UPS o podwójnej konwersji (VFI)	417
7.3.7.1. Prostownik	421
7.3.7.2. Inwerter	424
7.3.7.3. Układy zwiększające niezawodność i skalowanie mocy UPS	429
7.3.8. Układ o biernej gotowości (VFD)	437
7.3.9. UPS interaktywny (VI)	438
7.3.10. UPS Delta	441
7.3.11. Hybrydowy UPS	442
7.4. Układy stabilizacji napięcia i nadążnej kompensacji mocy biernej	445
7.4.1. Kompensator synchroniczny	445
7.4.2. Kompensatory/stabilizatory statyczne z nasyconym rdzeniem magnetycznym	447
7.4.2.1. Samonasycający się dławik	447
7.4.2.2. Dławik z obwodem sterującym prądu stałego	449
7.4.2.3. Stabilizator ferorezonansowy	451
7.4.3. Kompensatory/stabilizatory energoelektroniczne	455
7.4.4. Równoległe kompensatory statyczne	456
7.4.4.1. Baterie kondensatorów włączane łącznikami tyrystorowymi (TSC)	456
7.4.4.2. Układ ze stałą baterią kondensatorów i sterownikiem podstawowej harmonicznej prądu indukcyjnego (FC/TCR)	461
7.4.4.3. Układ TSC/TCR	466
7.4.4.4. STATCOM	467
7.4.5. Statyczne kompensatory szeregowo	471
7.4.5.1. Kompensacja zapadów i wzrostów napięcia (DVR)	473
7.4.5.2. Stabilizacja i symetryzacja napięcia	477
7.4.5.3. Filtracja wyższych harmonicznych napięcia	479
7.4.5.4. Zmiana reaktancji zastępczej sieci zasilającej	479
7.4.5.5. Szeregowe kondensatory	480
7.4.5.6. Przesuwniki fazowe	481

7.4.6. Uniwersalny układ do poprawy warunków dostawy energii	485
7.4.7. Układy przełączające	488
7.4.7.1. Przełączniki zaczepów transformatora	488
7.4.7.2. Transformatory dodawcze	489
7.5. Zasobniki energii elektrycznej	490
7.5.1. Nadprzewodnikowe zasobniki energii	496
7.5.2. Superkondensatory	498
7.5.3. Układy z kołem zamachowym	499
7.5.4. Kwasowo-ołowiowe baterie akumulatorów	501
Literatura	503
8. Regulacja jakości dostawy energii elektrycznej	516
8.1. Wprowadzenie	516
8.2. Zasady regulacji	517
8.2.1. Monitorowanie jakości dostawy energii	520
8.2.2. Minimalne standardy jakości dostawy energii	520
8.2.3. Mechanizm bodźców finansowych	520
8.2.4. Kontrakty „jakościowe”	521
8.2.5. Determinanty procesu regulacji jakości dostawy energii	523
8.3. Cele regulacji	526
8.4. Koszty złej jakości zasilania	527
8.5. Etapy regulacji jakości zasilania	529
8.5.1. Etap I	529
8.5.2. Etap II	530
8.5.3. Etap III	533
8.5.4. Indywidualne i systemowe wskaźniki jakości	533
8.6. Jakość napięcia	534
8.6.1. Regulacja napięcia a regulacja ciągłości zasilania	534
8.6.2. Podstawowe zasady regulacji jakości napięcia	535
8.6.3. Monitorowanie istniejącego poziomu jakości	536
8.6.4. Benchmarking	537
8.6.5. Gwarantowane minimalne poziomy jakości napięcia	538
8.6.6. Poziomy jakości napięcia gwarantowane umową	539
8.7. Globalne wskaźniki jakości napięcia	540
8.7.1. Wskaźniki oceny różnic między rzeczywistymi i idealnymi przebiegami napięć	541
8.7.2. Wskaźniki oceny kosztów złej jakości dostawy energii elektrycznej	542
8.7.3. Globalne zagregowane wskaźniki jakości	542
8.7.3.1. Całkowity wskaźnik jakości napięcia	543
8.7.3.2. Składowe całkowitego wskaźnika jakości napięcia	544
8.7.3.3. System bonifikat	548
Literatura	555

Załączniki	561
Załącznik 1: Podstawowe definicje	561
Załącznik 2: Klasy środowiska elektromagnetycznego	576
Załącznik 3: Wybrane normy dotyczące EMC i jakości energii elektrycznej	577
Skorowidz	589

Strona internetowa: www.jakoscenergii.agh.edu.pl

Załącznik 4: Klasyfikacja zaburzeń elektromagnetycznych według IEEE
Załącznik 5: Norma EN 50 160
Załącznik 6: Kontrakt na dostawę energii elektrycznej
Załącznik 7: Przykładowe miary liczbowe stosowane do oceny zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu
Załącznik 8: Przykłady
Załącznik 9: Analiza porównawcza wskaźników wahań napięcia
Załącznik 10: Analiza porównawcza współczynnika asymetrii napięcia
Załącznik 11: Jakość napięcia – analiza porównawcza obecných regulacji
Załącznik 12: Wymagania dotyczące jakości zasilania stosowane w przykładowych krajach Europy, różne od postanowień normy EN 50160
Załącznik 13: Przykładowe regulacje jakości napięcia w wybranych krajach